

Deep Triggered Non-Volcanic Tremor in the Slow Earthquake Active Regions in South Chile and Ecuador Deep Triggered Non-Volcanic Tremor in the Slow Earthquake Active Regions in South Chile and Ecuador

CHAO, Kevin^{1*}; OBARA, Kazushige¹
CHAO, Kevin^{1*}; OBARA, Kazushige¹

¹ERI, the University of Tokyo

¹ERI, the University of Tokyo

Deep non-volcanic tremor has been observed at many major plate-boundary faults and intraplate faulting systems. Recent studies have shown that the tremor triggered by surface waves of teleseismic earthquake occurs on the same fault patches as the spontaneously occurring ambient tremor. The observations suggest that the triggered tremor can be used as a proxy to estimate the background tremor activity. Here we search for tremor triggered by teleseismic earthquakes in south Chile and Ecuador where the ambient tremor and slow slip event have been observed respectively. In south Chile, we analyzed a temporal array data between 2004 and 2006 and observed clear triggered tremor following the 2004 Mw9.0 Sumatra, 2005 Mw8.6 Nias, and 2006 Tonga earthquakes. Triggered tremor sources are located at the central of the ambient tremor zone. The results indicate both Love and Rayleigh waves promote the tremor triggering potential. The tremor triggering threshold is around 2 kPa, similar to which in Parkfield. In Ecuador, we can only use single station to infer the existence of triggered tremor due to lack of seismic stations in this region. During the period between 2004 and 2012, we observed triggered tremor following the 2010 Mw8.8 Chile and 2007 Mw8.0 Peru earthquakes. Since there is no other station within 500 km near that station, we roughly estimate that the triggered tremor sources are located within 50 km from the station based on the attenuation of tremor from previous studies and the estimation of the time difference between P- and S-waves of triggered tremor. We infer that the triggered tremor source might be located at the region where the slow slip event has been observed. The apparent tremor triggering threshold in Ecuador is about 40 kPa. The high threshold infer a low background tremor rate or simply due to the network capability.

キーワード: non-volcanic tremor, triggered tremor, south America
Keywords: non-volcanic tremor, triggered tremor, south America

海底地震観測データの解析から明らかとなった日向灘における浅部低周波微動活動 Shallow low-frequency tremor activity in the Hyuga-nada, revealed by ocean bottom seismic observation

山下 裕亮^{1*}; 八木原 寛²; 内田 和也¹; 清水 洋¹; 平野 舟一郎²; 宮町 宏樹²; 馬越 孝道³; 山田 知朗⁴; 中元 真美¹; 福井 海世¹; 神菌 めぐみ¹
YAMASHITA, Yusuke^{1*}; YAKIWARA, Hiroshi²; UCHIDA, Kazunari¹; SHIMIZU, Hiroshi¹; HIRANO, Shuichiro²; MIYAMACHI, Hiroki²; UMAKOSHI, Kodo³; YAMADA, Tomoaki⁴; NAKAMOTO, Manami¹; FUKUI, Miyo¹; KAMIZONO, Megumi¹

¹九州大学地震火山観測研究センター, ²鹿児島大学南西島弧地震火山観測所, ³長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科, ⁴東京大学地震研究所

¹Institute of Seismology and Volcanology, Kyushu Univ., ²Nansei-Toko Observatory for Earthquakes and Volcanoes, Kagoshima Univ., ³Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies, Nagasaki Univ., ⁴Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo

2013 年 5 月下旬から 6 月下旬にかけて、種子島東方沖～宮崎市東方沖の日向灘プレート境界浅部領域において発生した浅部低周波微動活動を、海底地震観測によって捉えることに成功した [Yamashita et al., 2013 AGU fall meeting]. 本発表では、海底地震計の連続波形データにエンベロープ相関法 [Obara, 2002] を適用し、浅部低周波微動の震源決定を行った結果と活動様式の特徴について報告する。

海底地震観測

2013 年 4 月 17 日～7 月 4 日にかけて、日向灘南部のプレート境界浅部領域～プレート境界地震発生領域において 12 台の短期間・短周期海底地震計を用いた海底地震観測を行った。観測は九州大学・鹿児島大学・長崎大学・東京大学の共同研究であり、地震計の設置・回収には長崎大学水産学部練習船「長崎丸」の協力を得た。海底地震観測のうち 2 台は 1Hz のセンサーを搭載している。

震源決定

浅部低周波微動の震源決定には、エンベロープ相関法を用いた。海底地震観測で取得した 11 観測点の連続波形データに 2-8Hz のバンドパスフィルタをかけ、水平 2 成分を合成し、RMS エンベロープを作成後、20Hz にダウンサンプリングしたデータを用いた。解析は自動処理とし、150 秒の moving window を 75 秒ずつ移動させ、各観測点の RMS エンベロープ間の波形相関を計算し、相関係数の最大値が 0.85 以上の場合にその時刻差を観測点間の相対走時差として採用する。相対走時差データが 6 データ以上ある場合に、震源をグリッドサーチによって推定した。この際、震源位置と仮定する S 波速度も同時に未知数としてサーチした。出力された結果のうち、地震や T-phase などのイベントを取り除いて最終的なカタログを作成した。

結果

震源決定の結果、浅部低周波微動活動の特徴が明らかとなった。今回の活動は大きく分けて 2 つのマイグレーションエピソードで特徴づけられる。初めのエピソード (5 月下旬～6 月 14 日頃) では種子島東方沖で活動が始まり、6 月 10 日ごろから S08 観測点付近で活発化したあと、北西方向 (おおよそプレートの沈み込み方向) に進路を変えて、ちょうど S06 観測点付近までマイグレートした。2 つめのエピソード (6 月 17 日頃～25 日頃) では、S08 観測点付近から北西に向かってマイグレートし、6 月 19～20 日頃には S07 観測点付近で活動が活発化、6 月 21 日頃には東にマイグレートして S09 観測点付近で活動が活発化し、その後 S07・S09 観測点付近で活動が続いた。

考察

今回明らかとなった浅部低周波微動のマイグレーションは、プレート境界浅部で短期的スロースリップが発生していることを強く示唆している。震源域付近には九州パラオリッジが沈み込んでおり、今回の日向灘の浅部低周波微動活動はリッジよりも南側 (琉球弧側) に見られ、リッジよりも東側 (足摺岬沖) へ進展していない。特に、マイグレーションの方向が北西方向に変化している S08 観測点付近は九州パラオリッジの沈み込みに伴いプレート境界の深さが急激に浅くなる領域である [e.g., Park et al., 2009]。つまり、種子島東方沖あたりから浅部低周波微動活動を伴ったスロースリップが北へ進展し、九州パラオリッジにさしかかった際にリッジの高まりに沿ってスロースリップの進展方向が北西方向にシフトしたと考えられ、本研究結果から九州・パラオリッジがこの領域のプレート間すべりの広がりをコントロールするセグメント境界の役割を果たしていることが示唆される。今回見られた浅部低周波微動のマイグレーションパターンの再現性を確認するためにも、海底地震および測地観測を行うことが必要不可欠である。

SCG64-P02

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

謝辞

日向灘における海底地震観測では、長崎大学水産学部練習船・長崎丸（兼原壽生船長）の皆様に変にお世話になりました。

キーワード: 浅部低周波微動, 海底地震観測, 日向灘

Keywords: Shallow low-frequency tremor, Ocean Bottom Seismographic observation, Hyuga-nada

2014 年 1 月房総半島沖スロースリップイベントと群発地震活動 The Slow Slip Event off the Boso Peninsula on January 2014 and the associated earthquake swarm

木村 尚紀^{1*}
KIMURA, Hisanori^{1*}

¹ 防災科学技術研究所 (防災科研)

¹ National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)

はじめに

房総半島沖ではスロースリップイベント (Slow Slip Event: SSE) が群発地震を伴って 4-7 年間隔で繰り返し発生することが知られている。これまでに 1983 年、1990 年、1996 年、2002 年、2007 年、および 2011 年の発生が知られており、最新の活動は 2013 年 12 月末から 2014 年 1 月にかけて 2 年 2 カ月の繰り返し間隔で再来した。

SSE は、プレート境界浅部の巨大地震が発生する固着域と、深部の定常すべり域との間に位置する、プレート境界の性質が変化する遷移的な領域で発生する現象と考えられている。関東地方南部では、フィリピン海プレート上で 1923 年関東地震 (M_W 7.9) が発生し、その翌日に房総半島沖で M_W 7.5 の最大余震が発生した (武村, 1994; Kimura *et al.*, 2009; 本多ほか, 2014)。房総 SSE すべり域は最大余震震源域の深い側に位置しており、その活動を把握することはプレート境界での応力の蓄積状況をモニタリングする上で重要である。

そこで、房総 SSE に伴う群発地震の詳細な活動履歴を明らかにするとともに、測地データの解析により SSE 断層モデルを決定した。

データ・手法

房総半島沖の深さ 30km 以浅、2005 年 1 月 1 日以降に発生した地震を対象として、波形相関を用いた Double Difference 法によって詳細震源分布を決定した。初期震源は防災科研 Hi-net による。ただし、一部自動処理結果を含む。

防災科研 Hi-net に併設された高感度加速度計 (傾斜計) による記録を元に、Obara *et al.* (2004) に従い、断層位置・形状については genetic algorithm inversion、すべり量は最小二乗法により一様すべりの矩形断層モデルを決定した。傾斜変動の顕著な 2013 年 12 月 31 日から 2014 年 1 月 6 日にかけての傾斜変動量を用いた。傾斜記録は潮汐成分、気圧応答成分の補正を行った後、リニアトレンド成分を除去し、気圧補正には、波崎 2 観測点 (HA2H) の気圧観測値を使用した。すべりの方向はプレートの相対運動方向に固定した。

結果

今回の房総 SSE に伴う群発地震の大部分は、これまでの房総 SSE に伴う群発地震の発生域 (以後、地震発生域とする) の北端周辺で発生した。はじめ、一宮沖で地震が発生しはじめ、その後西に発生域が移動するとともに、地震発生域の南端および勝浦直下周辺でも地震が少数発生した。はじめ西の海域で地震が発生し東に移動する点は過去の房総 SSE と同様である。2007 年は主に地震発生域の北端周辺で地震が発生しており、これは今回の活動と類似している。ただし、群発地震の広がりや 2007 年の方がやや大きく、地震発生数も 2007 年の方が多し。一方、2011 年は勝浦直下辺りでも多くの地震が発生した。

最大の傾斜変動は勝浦東観測点 (KT2H) において北西傾斜の約 $0.4 \mu\text{radian}$ の変動が観測された。房総 SSE のすべり域は勝浦沖に決定され、規模は M_W 6.1 と推定された。すべり域の位置は、傾斜データから推定された 2007 年 (Sekine *et al.*, 2007) および 2011 年 (Hirose *et al.*, 2012) の初期のすべり域とほぼ重なる。傾斜データを見ると、2007 年 (M_W 6.4) と比較して KT2H での傾斜方向はほぼ同じだが変動量は約 1/2 と小さく SSE 全体の規模が小さいことと調和的である。2007 年と比較して今回の地震発生数が少なかったことは、SSE 規模の違いを反映している可能性がある。2011 年ははじめの 2 日半で北西方向に約 $0.3 \mu\text{radian}$ の傾斜変動が見られ、この期間の規模は M_W 6.2 と推定された (Hirose *et al.*, 2012)。この期間の傾斜変動の方向・変動量、および SSE の規模は今回に近い。また、この期間には地震発生域の北端周辺で地震が発生しており、今回の活動と類似している。一方、2011 年は初期の活動に続いて勝浦直下でも地震が発生するとともに、北北西方向に約 $1.0 \mu\text{radian}$ に達する大きな変動が見られたが、今回はこれに対応するような地震活動および傾斜変動は観測されていない。

議論

今回は、過去約 30 年間で最短の間隔で再来した。2011 年房総 SSE は再来間隔がそれまでで最短だったが、SSE の規模はそれまでとほぼ同程度であり、2011 年東北地方太平洋沖地震および余効変動による応力変化が房総 SSE の応力降下量の大きな割合に相当することから、応力増加により発生が早められた可能性が提案されている (Hirose *et al.*, 2012)。これに対して、今回はこれまでより規模が小さく、すべり域がほぼ同じだとするとすべり量が小さい可能性がある。この

SCG64-P03

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

ことは、これまでより応力蓄積量が小さい状態で発生し、そのために再来間隔が短くなった可能性を示唆している。房総半島沖の応力蓄積過程を明らかにするためには、さらにデータを追加し房総 SSE の詳細な震源過程を明らかにする必要がある。

謝辞：

解析には東京大学地震研究所および気象庁による地震観測データを使用させて頂きました。記して感謝いたします。

キーワード: スロースリップイベント, プレート境界, 群発地震活動, 関東地方

Keywords: Slow Slip Event, plate boundary, earthquake swarm, Kanto region

四国中部で 2013 年に発生した長期的スロースリップ A long-term slow slip event in central Shikoku in 2013

小林 昭夫^{1*}
KOBAYASHI, Akio^{1*}

¹ 気象庁気象研究所
¹ Meteorological Research Institute

日本では近年の稠密な GNSS 観測網 GEONET [国土地理院測地観測センター (2004)] の展開により、様々な時定数を持つプレート境界でのすべり現象が発見されている。南海トラフ沿いでは、数か月から数年の継続時間を持つ長期的スロースリップイベント (SSE) が、東海地域で 2001~2005 年に [Ozawa et al. (2002)、国土地理院 (2007)]、豊後水道付近で 1996~1997 年 [Hirose et al. (1999)]、2003 年 [Ozawa et al. (2004)]、2009~2010 年 [国土地理院 (2010)] に発生したことが観測された。この他に小規模な長期的 SSE が 1996~1997 年に紀伊水道 [Kobayashi (印刷中)]、2005 年に四国西部 [小林 (2010)]、2005 年から 3 回日向灘 [Yarai and Ozawa (2013)] で発生していたことが報告されている。

同じ南海トラフの沈み込み帯においても、長期的 SSE の発生する領域が限られていたり、発生間隔、発生規模が異なっていたりすることが明らかになってきている。長期的 SSE の過去および現在の発生を把握することは、プレート境界面の領域による状態の違いに関する情報を提供する。ここでは、GNSS の解析から明らかになった四国中部における 2013 年の長期的 SSE について報告する。

データは、国土地理院 GEONET の GNSS 日座標値 (F3 解) を用いた。非定常な地殻変動を見るため、プレートの沈み込みなどに伴う定常的な成分を除去する。東北地方太平洋沖地震の余効変動が残っているため、ある程度落ち着いた 2012 年 1 月から 1 年間のデータから直線トレンド係数を求め、全期間からその係数を用いて定常成分を差し引いた。年周変化については補正をしていない。また、GEONET 観測点のアンテナ交換などに伴う人為的要因によるオフセット [岩下・他 (2009)] は、国土地理院ホームページで公開されているデータセット [国土地理院 corrF3o.dat] を用いて補正した。

2012 年 10 月から 1 年間の非定常変位を見ると、中国地方から近畿地方の多くの観測点の水平変位は小さく、これらの地域の観測点はこの 1 年間に定常的な変動をしていたことを示している。一方、四国中部の観測点には南東向きの数 mm の水平変位が見られる。水平変位の見られた観測点の座標時系列と、中国地方 (北西側) の観測点との基線長変化を見ると、2013 年の前半に伸びの変化が見られる。

観測された 2013 年の非定常変位がプレート境界上のすべりによるものとして、すべり分布をインバージョンにより求めたところ、四国中部にすべりが推定された。すべりの中心はベルト状に分布する深部低周波地震よりやや南東側に位置している。すべりの規模は Mw6.2 相当で、南海トラフ沿いで報告されている他の長期的 SSE の規模より小さい。このような小規模な長期的 SSE は他にも発生している可能性があり、2002~2003 年の四国東部、2007~2008 年の四国中部にも南東向きの非定常変化が見られる。

本調査には国土地理院 GEONET の座標値、オフセット補正值を使用させていただきました。記して感謝いたします。

キーワード: 長期的スロースリップ, GNSS, 地殻変動, 四国中部
Keywords: long-term slow slip, GNSS, crustal deformation, central Shikoku

八重山スロースリップの時空間発展シミュレーション Rate and state simulation of Yaeyama slow slip events in the southwestern part of the Ryukyu Arc, Japan

奥田 亮介^{1*}; 平原 和朗¹; 宮崎 真一¹; 加納 将行¹; 大谷 真紀子¹
OKUDA, Ryosuke^{1*}; HIRAHARA, Kazuro¹; MIYAZAKI, Shinichi¹; KANO, Masayuki¹; OHTANI, Makiko¹

¹ 京都大学理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kyoto University

海溝型地震震源域の下部プレート境界上で発生する、スロースリップイベント (SSE) の活動は、海溝型大地震発生の前に変動する可能性が指摘されており、SSE を引き起こす摩擦特性を知ることは、海溝型大地震の発生を知る上で重要な鍵を握る。我々の最終目標は、SSE に対してデータ同化という手法を用いることで、SSE の原因となる断層面上の摩擦パラメータを推定し、海溝型地震の発生の予測に役立てることにある。本研究では、その第一歩として、まず、スロースリップ時のすべりの時空間発展のシミュレーションモデルの構築を行う。

今回対象とするのは、琉球弧南西部に位置する八重山諸島沖で繰り返し起きていている SSE である。この SSE は観測された回数が多く、SSE の発生に影響を与える大きな地震が観測期間中に近傍で起きていないという特徴がある。これがこの八重山 SSE を対象とした理由である。

Heki and Kataoka(2008) によると、八重山 SSE の特徴は、1) SSE は深さ 20-40km で発生している、2) 平均発生間隔は 6.3 ヶ月、3) その発生間隔の標準偏差は 1.2 ヶ月、4) 12.5cm/年と推定される非常に速い収束速度に対して SSE により解放されるすべり速度は 11.0cm/年、とまとめられる。

これらの特徴を再現するモデル構築を行うが、計算には均質半無限弾性体中の深さ 20-40km のプレート境界上に傾斜断層を設定し、断層面上の摩擦力は速度状態依存構成則に従うものとした。また発展則にはスローネス則 (Dietrich, 1979) を用い、準動的計算を行なった。本研究では Kato(2003) に従い、摩擦パラメータ A, B, L に対して、 $A - B < 0$ (速度弱化) かつ摩擦パラメータによって決まる臨界半径 (nucleation radius) に対する断層のアスペリティの半径の比が 1 より少し小さい領域を作ることにより、SSE を再現した。また、断層面のあるプレート境界面の浅部に 1771 年に起きた津波 (明和津波) を伴う大地震の原因となるアスペリティが存在すると考えられ (Nakamura, 2009)、津波石の年代測定から打ち上げられた年代間隔は 150-400 年 (Araoka et al., 2013) で、琉球海溝近傍浅部で数百年間隔で津波地震が発生した可能性がある。その影響も考慮した。

その結果、アスペリティ分布や摩擦パラメータを変えることで SSE の発生周期を調整できることや、浅部のアスペリティが断層面上のすべりにどのような影響を与えるかということが分かった。例えば、80km のサイズのアスペリティで、 $V_{pl}=12.5\text{cm/年}$ 、 $A=50\text{KPa}$ 、 $B=56\text{KPa}$ 、 $L=2.2\text{mm}$ と設定すると、繰り返し間隔約 6 ヶ月の SSE が発生する。また、SSE のすぐ浅部にプレート収束速度に対して 40 % のすべり遅れを持つ固着域を置くことで、SSE により解放されるすべり速度を 11.0cm/年に抑えることができるが、これは固着域の位置・サイズおよびすべり遅れ (固着) の程度による。このことは浅部の固着状態すなわち津波地震の予測の上で有効な情報であり今後更なる検討が必要である。さらに、繰り返し間隔をばらつかせるには、複数のアスペリティをおくことや階層的アスペリティ分布を考える必要がある。

キーワード: スロースリップイベント, 八重山, すべり速度・状態依存則

Keywords: slow slip events, Yaeyama, a rate- and state-dependent friction law

紀伊半島での短スパン伸縮計アレイ観測 Array observation of short span strainmeter in the Kii peninsula

加納 靖之^{1*}; 細 善信¹; 尾上 謙介¹
KANO, Yasuyuki^{1*}; HOSO, Yoshinobu¹; ONOUE, Kensuke¹

¹ 京大・防災研

¹ DPRI, Kyoto Univ.

紀伊半島や四国周辺では、深部低周波微動あるいは低周波地震の発生域を中心に、同じ時期に地殻変動(伸縮・傾斜変化)の発生が認められている。たとえば、京都大学防災研究所の紀州観測坑での伸縮計観測では、この地殻変動は発生域に近いほど大きく、低周波微動発生域から 30-40 km の距離で、 10^{-9} から 10^{-8} 程度のひずみ変化が数日にわたって生じることがわかっている。このひずみ変化は、地球潮汐によるひずみ変化と同程度の大きさである。このようなひずみを観測するには従来の伸縮計(横坑式あるいはボアホール式)が有効であるが、観測点数が限られており、詳細な解析には不十分である。特に紀伊半島西部では観測点が少ない。

伸縮計による多点観測のために、安価で観測点の設置が容易な方法と計器の開発が必要である。そこで従来の数十メートルの基準尺をもつ伸縮計の技術を応用し、基準尺の長さ約 1.5 m 程度の短スパンの伸縮計を開発した。基準尺はスーパーインバーの丸棒で、自由端(変位測定部)側で吊り棒を 1 か所設けている。変位の検出には差動トランスを使用した。安定した観測のためには、固定端および測定部を岩盤に強固に固定することが必要と考え、深さ 50 cm 程度掘削した穴にアンカー(ステンレス棒)をモルタルで固定し、その上部に測器のステージをネジ止めする方式とした。

このような短スパン伸縮計の試験機(1成分)を製作し、京都大学防災研究所の屯鶴峯観測坑(奈良県香芝市)に設置し性能試験を実施した。この試験観測では潮汐変動が明瞭に記録され、遠地地震によるひずみ地震動もとらえている。基準尺の長さが 1.5 m 程度であっても、低周波微動にともなう地殻変動の観測が可能となることが期待される。

基準尺 1.5 m の短スパン伸縮計を田辺市中辺路町に設置し、2012 年 9 月から観測を開始した。この観測点は使わなくなったトンネルを利用している。当初、坑道内の温度変化の影響が大きかったことから、伸縮計を断熱材でおおう、間仕切りを増強するなどの対策をおこなった。そのほか、降雨の影響も受けている。

2013 年 3 月はじめに紀伊半島で低周波地震活動があり、その際の伸縮計データを検討したところ、 5×10^{-9} 程度の伸縮変化がみられた。その変化の時系列から、変動源が西から東へ移動したことによって説明できることがわかった。これは、低周波地震活動の移動とも調和的な結果である。

田辺市(旧大塔町)など紀伊半島中西部において新たに短スパン伸縮計の設置をおこなっている。これらの新しい観測点に加え、従来の地殻変動連続観測点も用いて、深部低周波微動の発生域をとり囲むようなアレイ観測網を構築する。データを統合して解析することで、スローイベントについてより詳細な解析をおこなうことができると考えられる。

キーワード: 伸縮計, スロー地震, アレイ観測

Keywords: strainmeter, slow earthquakes, array observation